

王樱峻, 王爱林, 赵琳. 某高堆石坝防渗面板抗震能力分析及工程措施研究[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 128–137. [WANG Yingjun, WANG Ailin, ZHAO Lin. Seismic Capacity Analysis and Engineering Measure Study of Impervious Face Slab of a High Rockfill Dam [J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 128–137]

某高堆石坝防渗面板抗震能力分析及工程措施研究

王樱峻^{1, 2}, 王爱林¹, 赵琳^{1, 2}

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州 311122; 2. 浙江省抽水蓄能工程技术研究中心, 杭州 311122)

摘要: 某抽水蓄能电站上水库主坝高达182.3 m, 保证混凝土防渗面板的安全可靠运行, 是工程关键技术问题之一。针对该问题, 对防渗面板在地震工况下的工作性态开展了深入研究工作。通过计算分析, 提出合理可行的工程措施, 可为类似工程建设提供指导或借鉴。

关键词: 面板; 抗震; 接缝; 应力; 变形

中图分类号: TV312; TV641.4

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0128-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.18

Seismic Capacity Analysis and Engineering Measure Study of Impervious Face Slab of a High Rockfill Dam

WANG Yingjun^{1, 2}, WANG Ailin¹, ZHAO Lin^{1, 2}

(1. Power China East China Survey and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 311122, China; 2. Pumped Storage Engineering Center of Zhejiang Province, Hangzhou 311122, China),

Abstract: The main dam of the upper reservoir of a pumped storage power station is 182.3 m high. It is one of the key technical problems to ensure the safe and reliable operation of the impermeable concrete panel. In order to solve this problem, the working behavior of anti-seepage panel under seismic condition is studied in depth in this paper. Through calculation and analysis, reasonable and feasible engineering measures are put forward, which can provide guidance or reference for similar engineering construction.

Keywords: Face slab; Anti-seismic; Seam; Stress; Deformation

0 前言

我国西部、西南部等地区处于地震活动频繁和多发地带, 已建、在建和正在设计中的高堆石

坝工程往往存在强震的地质构造背景、断裂带等。经历“5.12”汶川大地震后, 按照现代工程技术建造的紫坪铺等大坝遭受远远超过原设计标准的地震强度, 产生的震害轻微, 发生的震害尚具备可修复性, 表明在现行技术和标准同时保证施工质

收稿日期: 2021-03-10

作者简介: 王樱峻(1969-), 男, 正高级工程师, 主要从事水电工程水工设计与咨询等工作。

E-mail: wang_yj1@hdec.com

量的前提下,建设高堆石坝具有良好的抗震性能,也大大增强了我们在强震区建设高堆石坝的信心^[1]。

提高高堆石坝抗震性能的有效措施之一是减少和控制地震时坝体变形, 因此国内历来对坝体变形控制非常重视, 其途径是提出较为严格的密实度指标、级配曲线, 施工时采用重型振动碾、薄层碾压等, 以期增加堆石体的整体压缩模量, 并对坝体较高部位采取有效抗震构造措施^[2-3]。但是, 高堆石坝防渗面板的抗震性能也是需要重视的, 若是地震时发生一定程度的破坏, 比如面板垂直缝挤压破坏、张拉裂缝、止水破坏等, 造成水库大坝渗漏量增加, 不仅成为大坝运行的重大隐患, 更可能放空检修或降低水位运行, 从而带来不可估量的经济损失^[4]。

本文依托某在建抽水蓄能电站的上水库主坝高堆石坝工程,对防渗面板在地震工况下的工作性态开展了深入研究和论证工作。在建立整体有限元模型网格基础上,合理确定计算参数及计算模型,得到面板动应力、变形及接缝变形成果。通过深入分析提出合理可行的工程措施,保证防渗面板安全可靠运行,可为类似工程建设提供指导或借鉴。

1 工程概况与计算模型

1.1 工程概况

1.1.1 总体布置

某抽水蓄能电站枢纽由上水库、下水库、输水系统、地下厂房及地面开关站等建筑物组成,属一等大(1)型工程。上水库流域面积约 0.63 km^2 ,

由主坝、副坝和库周山岭围成。正常蓄水位 267.00 m, 死水位 239.00 m, 总库容 1748 万 m^3 (相应于校核洪水位), 有效库容 1577 万 m^3 。主、副坝坝型均为混凝土面板堆石坝, 坝顶高程 272.40 m, 主坝最大坝高 182.30 m, 坝顶长度 811.45 m, 坝顶宽度 10.0 m, 上游面坡比 1: 1.4, 下游面 240 m 高程以上坡比为 1: 1.9, 以下 1: 1.8, 下游坝坡每隔 35 m 设一级马道, 马道宽 3 m。副坝最大坝高 36.60 m, 坝顶长度 194.00 m, 坝顶宽度 8.5 m。

库盆由一库底大平台及库周 1: 1.4 坡比的开挖坡形成, 平台高程 237.00 m。开挖后采用“库岸混凝土面板+库底厚 1.5 mm 的 HDPE 土工膜”防渗。上水库沿库周设库岸公路, 路面高程 272.40 m, 路面宽度 8.5 m, 总长约 3.0 km (含坝顶公路)。

上水库大坝及库底填筑需要的石料,从库盆石料场开采,其中B区石料场玢岩岩脉发育,开采的弱、微风化白云岩与玢岩混合料用于下游堆石及库底填筑。上水库主坝和库盆填筑量近3000万m³。

1.1.2 坝体分区

如图1所示,大坝混凝土防渗面板下的坝体填筑材料分成垫层区、过渡区、上游堆石区、下游堆石区等。垫层区及过渡区坡比均为1:1.4,水平宽度分别为3.0 m、5.0 m。大坝混凝土面板与库底土工膜之间采用连接板衔接,连接板顶高程为237.00 m,其下游设特殊垫层区,过渡区。上、下游堆石区之间分界坡比为1:0.5(倾向下游)。

为保证坝体排水,在下游堆石料下部设置堆石排水层,岸坡部位排水层厚3.0~5.0 m,河床部位厚8.0 m,河床宽约150 m。坝体及岸坡渗水由岸坡向河床部位汇集后,沿河床流向下流,并引至主坝坝后弃渣场沟底设置的排水箱涵。

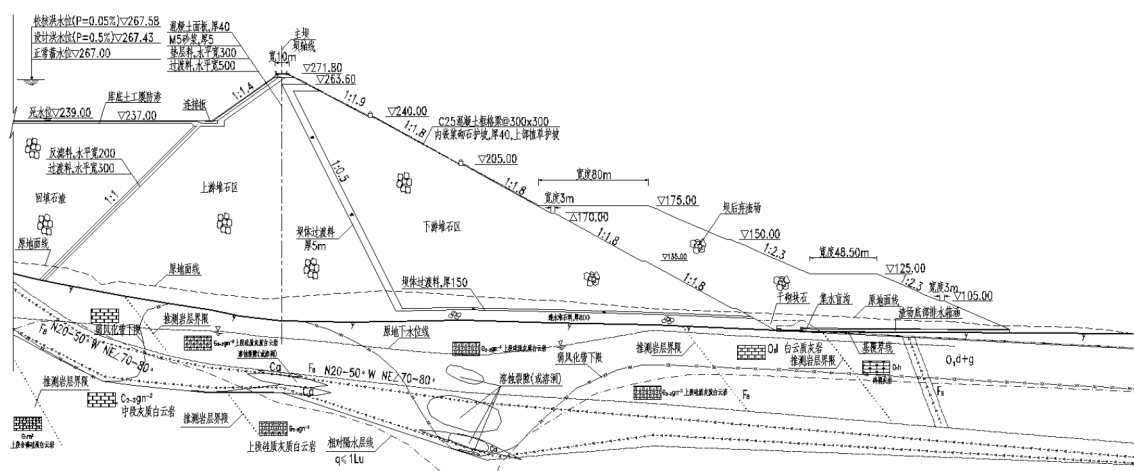


图1 上水库主坝典型断面图(单位:m)

Fig.1 Typical section of main dam of upper reservoir (unit: m)

1.1.3 防渗结构

坝体的防渗结构包括库岸及大坝混凝土面板、库底土工膜及混凝土连接板。面板混凝土强度等级为C30，抗渗等级W8，抗冻等级F100。面板厚度0.40 m，承受最大水力梯度为75。面板采用单层双向配筋，在面板挠曲变形较大部位和周边缝、张拉缝附近适当配置加强钢筋。

面板设置垂直缝，板块宽度12 m，分张性缝和压性缝两种。面板与连接板之间接缝为周边缝，与防浪墙之间接缝为防浪墙底缝。周边缝、垂直缝内均设两道止水，底部止水铜片，顶部为塑性填料嵌缝。

库底铺设厚1.5 mm的HDPE土工膜，与大坝防渗面板采用连接板连接，连接板宽6 m，厚0.6 m，用角钢将土工膜固定。

1.2 计算参数及计算模型

根据《中国地震动参数区划图》GB18306-2015

及场地地震安全性评价报告，本工程场地50年超越概率10%的基岩地震动水平向峰值加速度为0.092 g，相应的地震基本烈度为Ⅷ度。上下水库大坝等壅水建筑物的抗震设防类别为甲类，抗震设防烈度为Ⅷ度，取基准期100年超越概率2%、1%的地震动参数作为设计、校核地震，加速度代表值0.20 gal、0.23 gal。

通过坝体填筑料静动力特性室内试验，取得相应的筑坝材料试验指标。根据现行规范规定，在地震工况下，混凝土材料的动态强度、动弹性模量可较其静态标准值提高20%、50%，动态抗拉强度标准值取动态抗压强度标准值的10%。

图2和图3为计算过程中采用的100年超越概率2%和1%的场地谱基岩加速度时程曲线。各基岩加速度时程的时程数据采样间隔0.02 s，持续时间为40.94 s。地震动输入采用轴向、顺河向和垂直向三向输入，垂直向地震动输入峰值加速度取水平向的2/3。

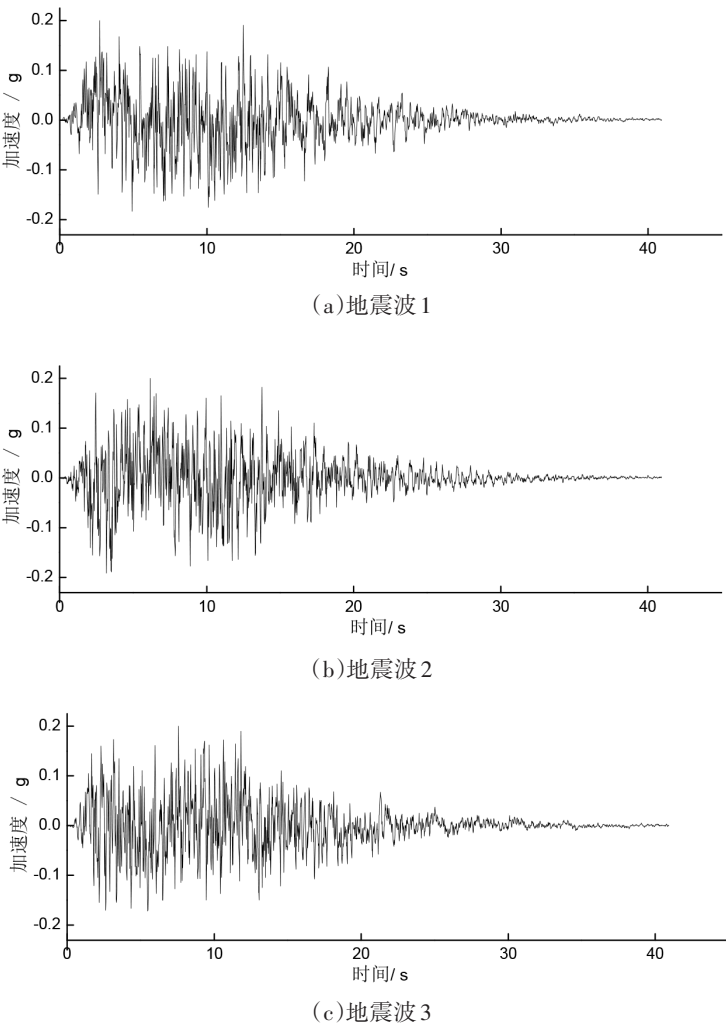


图2 场地100年超越概率2%基岩加速度时程曲线

Fig.2 Time history curve of bedrock acceleration with 100 years exceedance probability of 2%

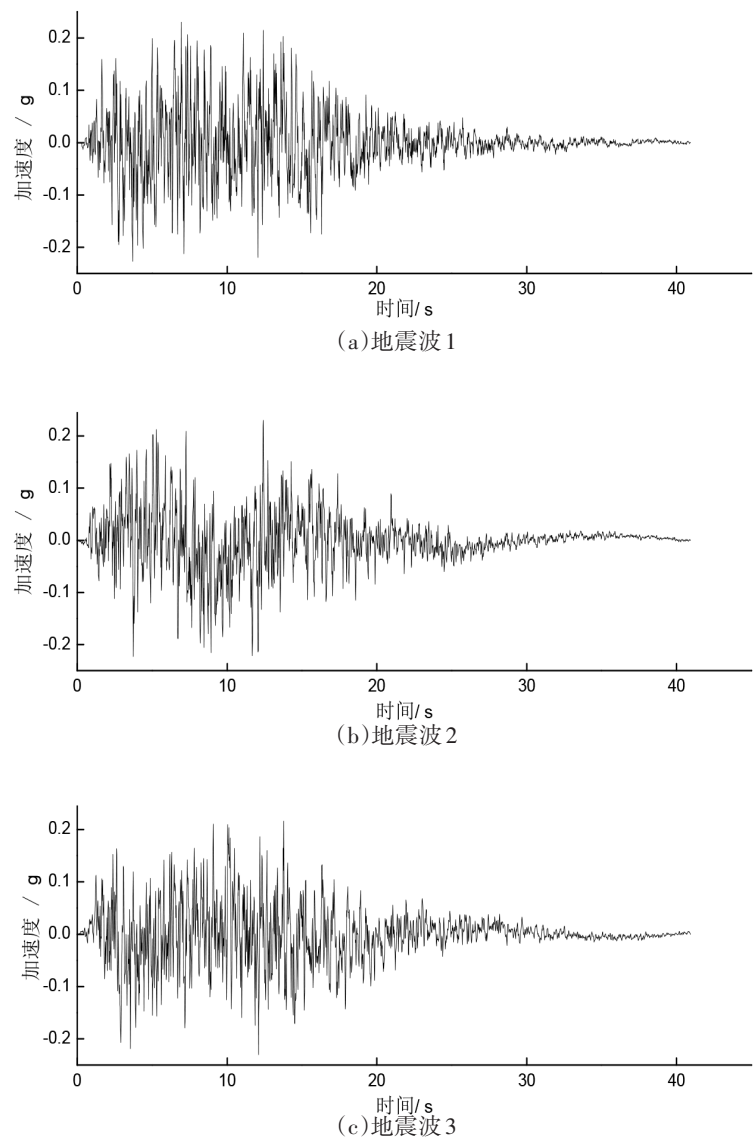


图3 场地100年超越概率1%基岩加速度时程曲线

Fig.3 Time history curve of bedrock acceleration with 100 years exceedance probability of 1%

动力计算采用时程分析法，应用等效线性粘弹性模型和逐步积分法模拟地震过程，分成若干时段进行分析。本次计算分析中采用了等效线性粘弹性模型，剪切模量和阻尼比随着剪应变的关系按沈珠江模型确定，从而考虑了堆石体动力变形的非线性性质。为了反映面板与垫层之间的相互作用，设置接触面单元，面板垂直缝采用分离缝单元模拟，可以张开和错动；面板周边缝接缝材料采用连接单元模拟。

计算分别考虑场地谱人工合成地震波和规范谱人工合成地震波，场地谱人工合成波由地震工程研究院提供，规范谱人工地震波根据规范谱人工合成。反应谱 $\beta_{\max}=2.25$ ；场地类别为II，取特征周期 $T_g=0.30\text{ s}$ 。

2 主要计算成果

2.1 面板动应力与变形

表1~表2分别给出了场地谱及规范谱在设计和校核地震作用下，上水库主坝面板顺坡向应力、面板坝轴向应力和震后挠度。由表可以看出，规范谱地震下面板顺坡向应力、坝轴向应力及震后挠度比场地谱小。

图5~图10分别给出了场地谱设计地震作用下，上水库主坝面板顺坡向和坝轴向在地震过程中出现的最大动拉、压应力分布。计算表明：面板在地震过程中出现了较明显的拉、压应力波动。顺

坡向动应力主要受面板地震过程中挠曲变形的影响，顶部由于“鞭梢效应”的影响，地震惯性力较大，面板顺坡向瞬时弯曲应力作用明显；坝轴向动应力主要受坝轴向加速度的影响。面板顺坡向地震瞬间最大动拉应力为 1.90 MPa，最大动压应力为

2.70 MPa，出现在面板中部。面板坝轴向地震瞬间最大动拉应力为 0.95 MPa，出现在转折处的面板顶部，最大动压应力为 1.25 MPa，出现在坝中面板中上部。

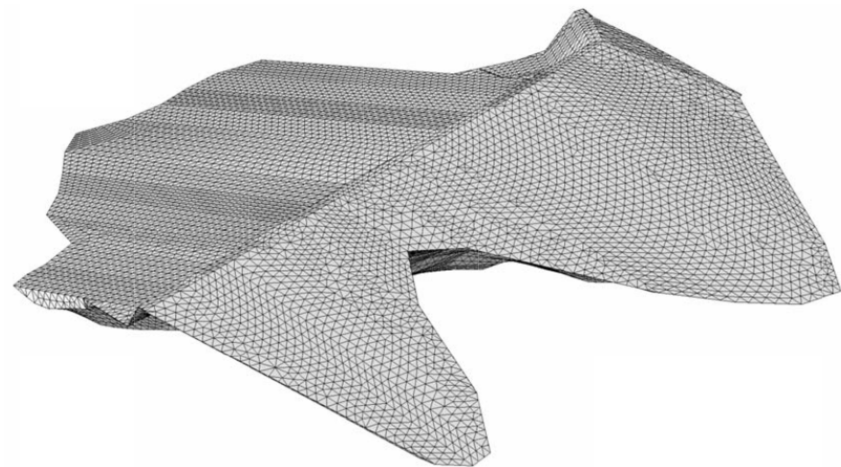


图4 上水库主坝三维有限元动力计算模型
Fig.4 Three dimensional finite element dynamic calculation model of main dam of upper reservoir

表 1 场地谱及规范谱地震作用下面板顺坡向应力成果表

Table 1 Results of stress along slope of slab under site spectrum and code spectrum earthquake							
工况		静拉/ (MPa)	静压/ (MPa)	动拉应力/ (MPa)	动压应力/ (MPa)	静+动拉应力/ (MPa)	静+动压应力/ (MPa)
场地谱	设计地震	0.23	1.62	1.90	2.70	1.15	3.46
	校核地震	0.23	1.62	2.03	2.95	1.23	3.59
规范谱	设计地震	0.23	1.62	1.87	2.65	1.10	3.34
	校核地震	0.23	1.62	2.01	2.90	1.20	3.55

表 2 场地谱及规范谱地震作用下面板坝轴向应力和震后挠度成果表

Table 2 Results of axial stress and post earthquake deflection of slab dam under site spectrum and code spectrum earthquake										
工况		静拉/ (MPa)	静压/ (MPa)	动拉 应力/ (MPa)	动压 应力/ (MPa)	静+动拉 应力/ (MPa)	静+动压 应力/ (MPa)	静挠度/ cm	动挠度/ cm	静+动 挠度/cm
场地谱	设计地震	0.33	0.65	0.95	1.25	1.03	1.76	12.5	15.5	22.1
	校核地震	0.33	0.65	1.02	1.33	1.09	1.84	12.5	19.6	29.5
规范谱	设计地震	0.33	0.65	0.92	1.22	1.00	1.72	12.5	13.6	20.8
	校核地震	0.33	0.65	1.00	1.31	1.06	1.83	12.5	17.3	26.5

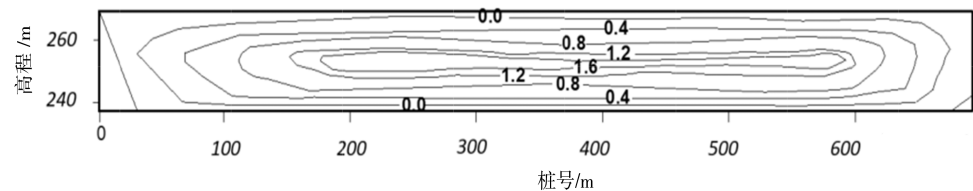


图5 蓄水期面板顺坡向应力(MPa)
Fig.5 Slope stress of face slab during impoundment period(MPa)

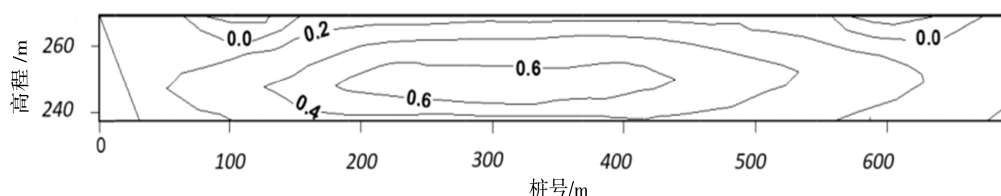


图6 蓄水期面板坝轴向应力(MPa)

Fig.6 Axial stress of concrete face dam during impounding period(MPa)

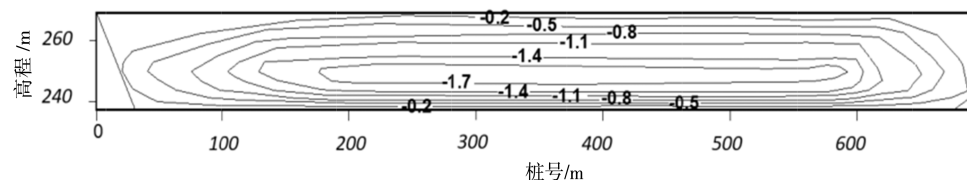


图7 面板顺坡向最大动拉应力(MPa)

Fig.7 Maximum dynamic tensile stress of face slab along slope(MPa)

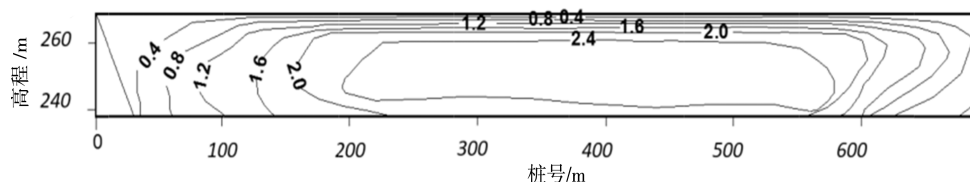


图8 面板顺坡向最大动压应力(MPa)

Fig.8 Maximum dynamic pressure stress of face slab along slope(MPa)

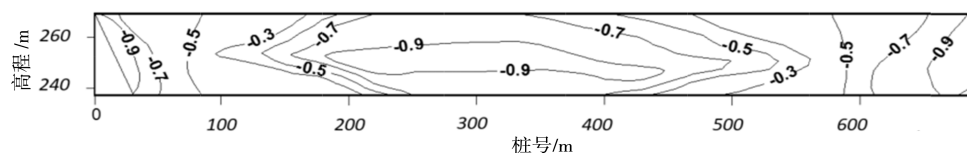


图9 面板坝轴向最大动拉应力(MPa)

Fig.9 Maximum axial dynamic tensile stress of concrete face dam(MPa)

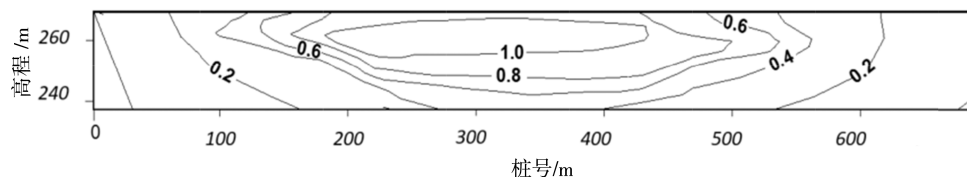


图10 面板坝轴向最大动压应力(MPa)

Fig.10 Maximum axial dynamic pressure stress of concrete face dam(MPa)

设计地震工况面板静动应力叠加如图11~图14所示。静动应力叠加后,面板顺坡向最大压应力为3.60 MPa,最大拉应力为1.15 MPa。面板坝轴向最大压应力为1.76 MPa,最大拉应力为1.03 MPa。

根据现行抗震规范的规定,在地震工况下,混凝土材料的承载力可较静力工况下提高20%。因此动静应力叠加后没有超过C30材料的允许强度,面板在地震中不至破坏。

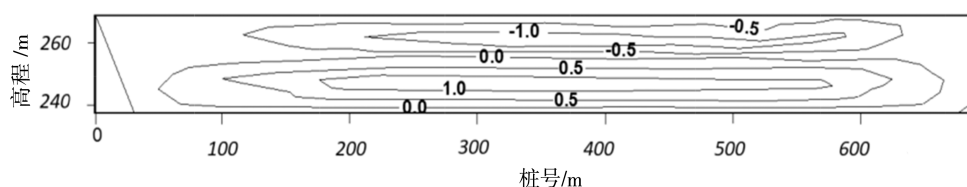


图11 面板顺坡向静应力+最大动拉应力(单位:MPa)

Fig.11 Static stress along slope + maximum dynamic tensile stress of panel(unit:MPa)

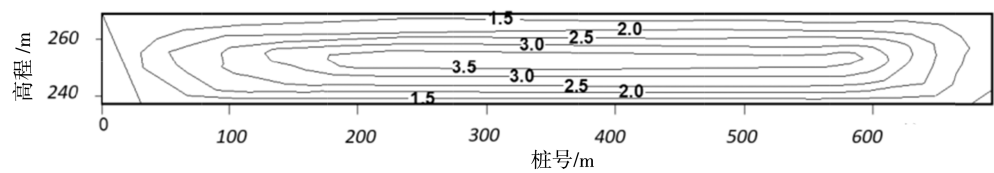


图12 面板顺坡向静应力+最大动压应力(单位:MPa)
Fig.12 Static stress along slope + maximum dynamic pressure stress of face slab (unit:MPa)

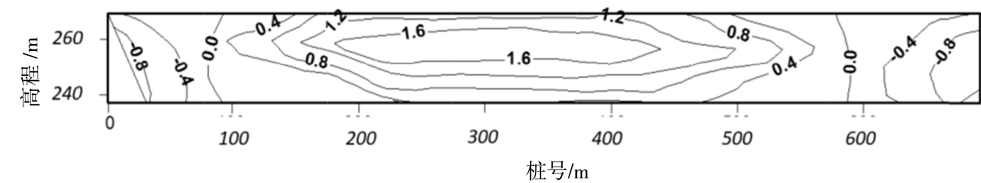


图13 面板坝轴向静应力+最大动拉应力(单位:MPa)
Fig.13 Axial static stress + maximum dynamic tensile stress of concrete face dam (unit:MPa)

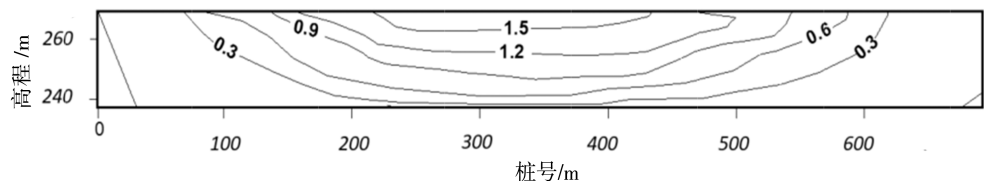


图14 面板坝轴向静应力+最大动压应力(单位:MPa)
Fig.14 Axial static stress + maximum dynamic pressure stress of concrete face dam (unit:MPa)

图15给出了地震后面板的挠度。由图可见，发生在底部，最大挠度变形为22.1 cm，面板挠度约为坝高的0.11%。

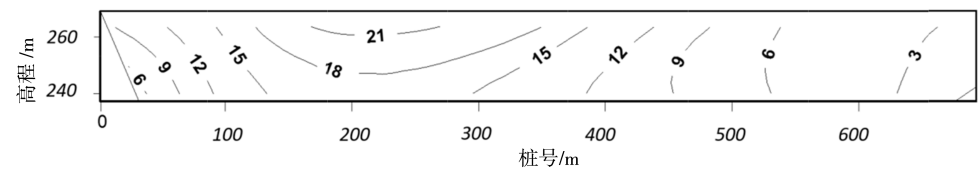


图15 面板震后挠度(单位:cm)
Fig.15 Face slab deflection after earthquake (unit:cm)

2.2 接缝变形

表3为上水库主坝在设计和校核地震工况分别

采用规范谱动输入和场地谱动输入时的震后接缝变位最大值。由表可见，随着地震动输入加速度的增大，接缝变形均有所增大。

表3 场地谱及规范谱地震作用下震后接缝位移成果表											
Table 3 Results of post earthquake joint displacement under site spectrum and code spectrum earthquake											
位置	工况	张拉/mm			错动/mm			沉陷/mm			
		静	动	静+动	静	动	静+动	静	动	静+动	
周边缝	场地谱	设计地震	13.4	10.3	17.5	7.3	5.6	8.8	12.8	10.8	16.9
		校核地震	13.4	11.3	17.9	7.3	6.4	9.1	12.8	12.1	17.8
	规范谱	设计地震	13.4	9.6	15.7	7.3	5.0	8.0	12.8	8.1	15.0
		校核地震	13.4	10.3	16.1	7.3	5.7	8.3	12.8	9.8	15.6

(转下表)

(接表3)

位置	工况	张拉/mm			错动/mm			沉陷/mm			
		静	动	静+动	静	动	静+动	静	动	静+动	
垂直缝	场地谱	设计地震	3.3	3.4	5.0	3.8	4.0	5.8	2.1	3.2	3.8
		校核地震	3.3	4.2	5.4	3.8	4.6	6.1	2.1	3.9	4.2
	规范谱	设计地震	3.3	2.4	4.2	3.8	2.9	4.8	2.1	2.4	3.3
		校核地震	3.3	3.2	4.7	3.8	3.5	5.2	2.1	2.9	3.5

场地谱设计地震作用下，上水库主坝震后面板周边缝变形见图16~图18。周边缝三向变形震后都有所增大，最大张开为17.5 mm，位于桩号0+178 m左右；最大错动为8.8 mm，位于桩号0+158 m附近；最大沉陷为16.9 mm，位于桩号0+248 m

左右，接缝止水变形在允许范围内。
面板垂直缝震后变形增大，最大张开为5.0 mm，距离右岸30 m左右；最大错动为5.8 mm，位于桩号0+208 m附近；最大沉陷为3.8 mm，距离右岸10 m左右，接缝止水变形在允许范围内。

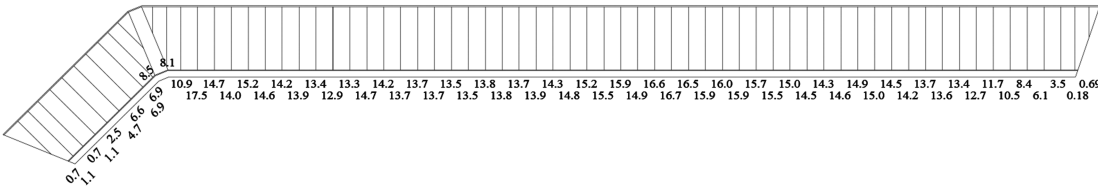


图16 震后面板周边缝张拉变形(单位:mm)
Fig.16 Tension deformation of peripheral joint of panel after earthquake(unit:mm)

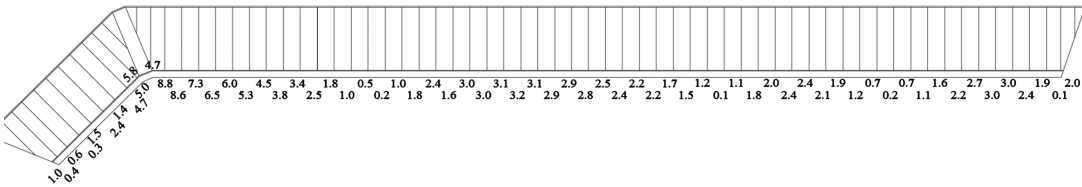


图17 震后面板周边缝错动变形(单位:mm)
Fig.17 Dislocation deformation of peripheral joint of panel after earthquake(unit:mm)

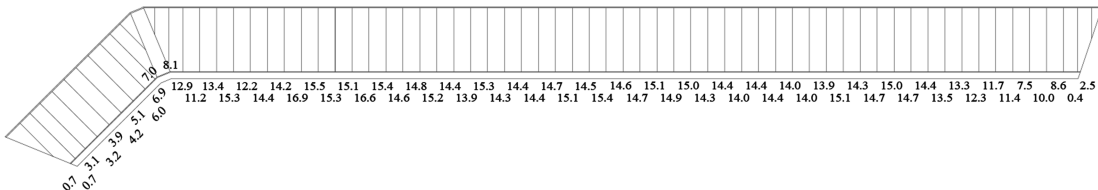


图18 震后面板周边缝沉陷变形(单位:mm)
Fig.18 Subsidence and deformation of peripheral joints of panel after earthquake(unit:mm)

3 面板及接缝极限抗震能力分析^[5-7]

3.1 面板应力分析

不同输入基岩加速度峰值下上水库大坝面板的应力计算结果汇总于表4。由表4可见，对于上水

库大坝，当输入峰值加速度达到0.50 g时，面板中顺坡向最大静动叠加拉应力为2.29 MPa超过C30混凝土允许抗拉强度，此时面板拉应力，坝轴向拉应力较大部位主要集中在面板两侧，顺坡向拉应力较大部位主要集中在面板的中上部。因此从面板安全性角度来看，上水库面板堆石坝极限抗震能力在0.40~0.50 g左右。

表 4 不同峰值加速度下面板应力特征值 (单位:MPa)

Table 4 Characteristic values of panel stress under different peak accelerations (unit:MPa)

工况		顺坡向				坝轴向			
		动拉应力	动压应力	静力叠加动拉应力	静力叠加动压应力	动拉应力	动压应力	静力叠加动拉应力	静力叠加动压应力
上水库	0.20 g	1.90	2.70	1.15	3.60	0.95	1.25	1.03	1.76
	0.23 g	2.03	2.95	1.23	3.59	1.02	1.33	1.09	1.84
	0.30 g	2.43	3.66	1.70	4.23	1.27	1.48	1.30	2.01
	0.40 g	2.77	4.35	2.13	4.82	1.63	1.79	1.68	2.33
	0.50 g	3.30	5.03	2.29	5.41	1.99	2.10	2.06	2.66
	0.60 g	3.67	6.08	3.26	6.45	2.35	2.54	2.34	3.11

3.2 接缝变形分析

表 5 给出了不同峰值加速度下计算得到的震后面板周边缝三向变位特征值。由于地震永久变形的影响,震后面板周边缝位移将有所增加,且随着地

震强度的增大而增大。本工程接缝止水变形按张开 50 mm、错动 25 mm、沉陷为 80 mm 设计。为此,根据周边缝的极限变形可以将上水库的极限抗震能力定为 0.6~0.7 g。

表 5 不同峰值加速度下震后面板周边缝变形特征值 (单位:mm)

Table 5 Characteristic values of deformation of peripheral joints of panel after earthquake under different peak accelerations (unit:mm)

工况		周边缝变形		
		张拉	错动	沉陷
上水库	0.20 g	17.5	8.8	16.9
	0.23 g	17.9	9.1	17.8
	0.30 g	19.2	9.7	18.7
	0.40 g	23.8	12.4	23.8
	0.50 g	28.6	14.8	29.3
	0.60 g	36.4	19.7	38.6
	0.70 g	49.2	26.2	50.2

虽然从面板、接缝安全性角度分析,上水库面板极限抗震能力在 0.40~0.50 g 左右,但这只是理论值,与工程实际可能存在一定的出入。大坝的极限抗震能力,目前没有统一的标准可供参照,需要结合实际震害资料、模型试验、动力分析等进行更多的探索性研究。面板、接缝的抗震能力,与垫层、堆石密实度、施工质量、地震荷载与输入方向、运行条件等多种因素有关。

4 计算成果分析及工程措施

(1)防渗面板位于大坝堆石体上,因此堆石体的变形控制,减小震陷对面板抗震安全性至关重要。主要工程措施是提高坝体压缩模量。紫坪铺

大坝堆石压缩模量达 180 MPa,是大坝震陷较小的主要原因。因此,应以控制面板挠度为目的限制震陷。考虑到本工程大坝填筑高度大,抗震设防烈度高,可以在坝体顶部 1/4~1/3 坝高范围设置增模区,减小地震作用下堆石料的剪缩,以进一步减少震陷量^[8-9]。

(2)计算分析表明,设计地震工况下,静动应力叠加后,面板顺坡向最大拉应力为 1.15 MPa,坝轴向最大拉应力为 1.03 MPa,面板拉应力分布区域较大,地震时存在开裂风险。为此,适当加大面板下垫层料细颗粒含量、保证足够宽度是必要的。

谢拉德认为,面板下应设置渗透系数较低,施工中又不产生颗粒分离的垫层料,既可起限漏作用,又可为面板水下堵漏创造条件^[2]。高堆石坝

的渗控设计中,应要求垫层料起第二道防渗线的作用,本工程垫层料要求级配连续,小于5 mm 颗粒含量在30%~55%范围较合适,其渗透性属半透水。垫层料采用3 m 宽度,以提高渗流稳定性,一旦在地震时面板受到破坏,能够有效限渗和反滤。

(3)由于地震工况下,防渗面板受力欠佳,同时,结构缝的表面塑性止水“V”型槽进一步削弱了面板断面,因此应在规范规定范围内尽量采用较厚面板,以降低面板拉应力水平。面板厚度 $t=0.3\sim 0.4+0.002\sim 0.0035 H$ (H 为坝基至面板顶部高度, m),应按照接近厚度计算公式的上限确定面板厚度。

混凝土面板一般采用单层双向配筋,每向配筋率0.3%~0.5%,布置在面板中部。为防止地震发生时面板混凝土的挤压破坏,在库岸周边缝和面板垂直缝附近可配置加强钢筋,长度约1.5 m,双层双向配筋,置于面板的顶部和底部。

(4)计算表明,地震本身对面板接缝止水结构的影响很小,本工程大坝在场地谱设计地震作用下,震后面板周边缝最大张开17.5 mm,错动8.8 mm,沉陷16.9 mm,变形在允许范围内。由于地震引起面板严重错位导致接缝止水的二次破坏是要予以重视的,如紫坪铺面板堆石坝在汶川地震后,大部分止水是有效的,在面板错位较大部位,表面止水有所破坏。因此,对接缝设计进行优化,加强止水结构抗震性能还是必要的。

为避免地震产生面板的挤压破坏,可在面板中部压性缝内填塞浸沥青松木板,缝宽12 mm,以达到削减地震波的目的;面板垂直缝与周边缝、防浪墙底缝之间铜止水片采用“T”字型异型接头,要求整体冲压成型;接缝止水材料应是完全塑性的,能在水压作用下挤入因地震而张开的缝腔,止水面膜有较大的强度和延伸率,能适应地震冲击波。

(5)本工程大坝堆石料采用库内开挖的弱、微风化白云岩,饱和抗压强度40~60 Mpa,碾压后破碎料高,大坝变形控制难度大;上水库采用全库盆面板防渗,在大坝与库岸转折处的面板受力复杂,地震工况下出现开裂、错位等可能性大;本工程抗震设防烈度高,地震工况下面板的拉应力区域大,受力复杂。因此,可进一步开展沥青混凝土面板的适应性研究。

5 结语

本文对某在建抽水蓄能电站上水库主坝高堆石坝进行了地震工况下的动应力与变形计算,并开展面板及接缝极限抗震能力分析,研究提出了控制坝体变形、坝顶设置增模区,适当加大面板下垫层料细颗粒含量,优化面板及接缝结构等工程措施。

沥青混凝土面板由于具有较好的柔性,地震时面板应力分布均匀,且在库盆转弯处可设置成曲线,总体对上水库适应性更好,可通过计算分析比较后得出明确结论。本文的研究思路、工程措施等,可为其他类似工程提供参考或借鉴。

高堆石坝抗震安全计算分析是涉及多因素、非线性、非连续的复杂问题,今后要加强防渗体局部损伤和渐进破坏机理研究,开展精细化计算,地震破坏全过程高仿真模拟等方面工作,以使计算成果更加接近工程实际,工程措施合理有效^[10]。

参考文献

- [1] 王富强,刘超,周建平,等.我国高土石坝抗震安全研究进展[J].水电与抽水蓄能,2017(2):33-37.
- [2] 曹克明,徐建军.高面板堆石坝设计原则探讨[J].水力发电,2012,38(1):4-10.
- [3] 徐泽平.现代高混凝土面板堆石坝筑坝关键技术与研究进展[J].水利学报,2019(50):(62-75).
- [4] 孔宪京,张宇,邹德高.高面板堆石坝应力分布特性及其规律[J].水利学报,2013,44(6):631-639.
- [5] 卢羽平,窦向贤.超高面板堆石坝极限抗震能力与安全性分析[J].人民长江,2014,45(8):46-50.
- [6] 赵剑明,刘小生,杨玉生,等.高面板堆石坝抗震安全评价标准与极限抗震能力研究[J].岩土工程学报,2015,37(12):2254-2260.
- [7] 陈生水,李国英,傅中志.高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J].岩土工程学报,2013,35(1):59-65.
- [8] 陈生水,方绪顺,钱亚俊.高土石坝地震安全评价及抗震设计思考[J].水利水电工程学报,201133(1):17-20.
- [9] 朱晟.土石坝震害与抗震安全[J].水力发电学报,2011,30(6):40-51.
- [10] 孔宪京,邹德高,刘京茂.高土石坝抗震安全评价与抗震措施研究进展[J].水力发电学报,2016,35(7):1-14.